

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra materiálu



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ
KATEDRA MATERIÁLU

Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3911R018 Materiály a technologie
Zaměření: Materiálové inženýrství

**Vliv podmínek tepelného zpracování na mechanické vlastnosti slitiny
AlSi7Mg0,3**

**Effect of Heat Treatment on the mechanical properties of the alloy
AlSi7Mg0,3**

KMT – B – 169

Radek Kreisinger

Vedoucí práce: RNDr. Věra Vodičková, Ph.D.
Konzultant: Ing. David Dužda - Unitherm s.r.o. Jablonec nad Nisou

Počet stran: 40
Počet tabulek: 7
Počet obrázků: 21

V Liberci, 25. května 2011



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	Radek KREISINGER
studijní program	2341 B Strojírenství
obor	Materiály a technologie
zaměření	Materiálové inženýrství

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářská práce na téma:

Vliv podmínek tepelného zpracování na mechanické vlastnosti slitiny AlSi7Mg0,3

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Seznamte se se způsobem tepelného zpracování slitiny AlSi7Mg0,3 ve firmě Unitherm s.r.o. Jablonec nad Nisou.
2. Sledujte vliv teploty a doby umělého stárnutí vzorků této slitiny na mechanické vlastnosti (R_m , $R_{p0,2,A}$) a tvrdost při zachování konstantní teploty a doby rozpouštěcího žíhání.
3. Proveďte metalografickou analýzu vzorků po tepelném zpracování.
4. Získané výsledky vyhodnoťte a formulujte závěry.

Forma zpracování bakalářské práce:

- průvodní zpráva v rozsahu 25 - 40 stran
- přílohy

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):

- [1] Ptáček,L. a kolektiv: Nauka o materiálu I, Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2003
- [2] Michna,Š. a kol.: Encyklopedie hliníku, Prešov : Adin, 2005. ISBN 80-89041-88-4
- [3] firemní podklady firmy Unitherm s.r.o.

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Věra Vodičková,Ph.D.
Konzultant bakalářské práce : Ing. David Dužda - Unitherm s.r.o. Jablonec nad Nisou

L.S.

prof. Ing. Petr LOUDA,CSc.
vedoucí katedry

doc. Ing. Miroslav MALÝ,CSc.
děkan

V Liberci dne 04.10.2010

Platnost zadání bakalářské práce je 15 měsíců od výše uvedeného data (v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ) .Termíny odevzdání bakalářské práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

ANOTACE

Bakalářská práce se zabývá zkoumáním vlivu teploty a doby umělého stárnutí vzorků slitiny AlSi7Mg0,3 na mechanické vlastnosti (R_m , $R_{p0.2}$, A a tvrdost). Byly provedeny zkoušky v tahu, zkoušky tvrdosti a analyzována struktura materiálu pomocí LOM. Závislost mechanických vlastností na teplotě a době umělého stárnutí byla vyhodnocena graficky a byla doporučena optimální konfigurace podmínek tepelného zpracování.

KLÍČOVÁ SLOVA: slitiny hliníku, siluminy, tepelné zpracování, mechanické vlastnosti

ANNOTATION

This thesis describes the influence of temperature and of artificial ageing time of samples alloy AlSi7Mg0.3 on its mechanical properties (R_m , $R_{p0.2}$, A and hardness). Tensile tests and hardness tests were realized and structure of material was analysed by LOM. The dependence of mechanical properties on temperature and ageing time was described through the graphs. The optimal configuration for heat treatment was recommended.

KEY WORDS: aluminum alloys, silumin, heat treatment, mechanical properties

Poděkování

Úvodem děkuji vedoucí bakalářské práce RNDr. Věře Vodičkové, Ph.D. za odborné rady a připomínky při vypracování. Dále bych rád poděkoval Ing. Davidovi Duždovi a Ing. Petře Prokopčákové, Ph.D. za pomoc při praktické realizaci experimentů.

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Obsah

1. Teoretická část.....	10
1.1. Slitiny hliníku.....	10
1.1.1. Dělení slitin hliníku.....	10
1.1.2. Slévárenské slitiny.....	11
1.1.2.1. Druhy slévárenských slitin	11
1.1.3. Tvářené slitiny hliníku.....	12
1.2. Struktura a vlastnosti siluminů.....	14
1.3. Způsoby zvyšování mechanických vlastností siluminů	15
1.3.1. Modifikace	15
1.3.2. Legování siluminů.....	16
1.4. Tepelné zpracování hliníkových slitin.....	18
1.4.1. Vytvrzování	18
2. Použité experimentální metody	20
2.1. Tahová zkouška.....	20
2.2. Tvrdost.....	21
2.3. Optická mikroskopie	21
3. Experiment – výsledky	22
3.1. Použitá slitina a použité tepelné zpracování.....	22
3.1.1. Slitina AlSi7Mg0,3.....	22
3.1.2. Tepelné zpracování slitiny AlSi7Mg0,3.....	23
3.2. Výsledky tahové zkoušky	24
3.2.1. Průběh měření	24
3.2.2. Naměřené výsledky	24
3.2.3. Protokoly o zkoušce tahem - příklady	26
3.3. Výsledky měření tvrdosti.....	27
3.3.1. Průběh měření	27
3.3.2. Naměřené výsledky	27
3.4. Metalografie	28
3.4.1. Příprava vzorků.....	28
3.4.2. Metalografie – výsledky	28

4.	Diskuse.....	33
4.1.	Zjištěné závislosti.....	33
4.1.1.	Závislost meze pevnosti v tahu na teplotě a době umělého stárnutí.....	33
4.1.2.	Závislost smluvní meze kluzu na teplotě a době umělého stárnutí.....	34
4.1.3.	Závislost tažnosti na teplotě a době umělého stárnutí.....	35
4.1.4.	Závislost tvrdosti na teplotě a době umělého stárnutí.....	36
4.1.5.	Průměrné hodnoty mechanických vlastností.....	37
4.1.6.	Porovnání mechanických vlastností.....	37
5.	Závěr	39
6.	Seznam použité literatury.....	40

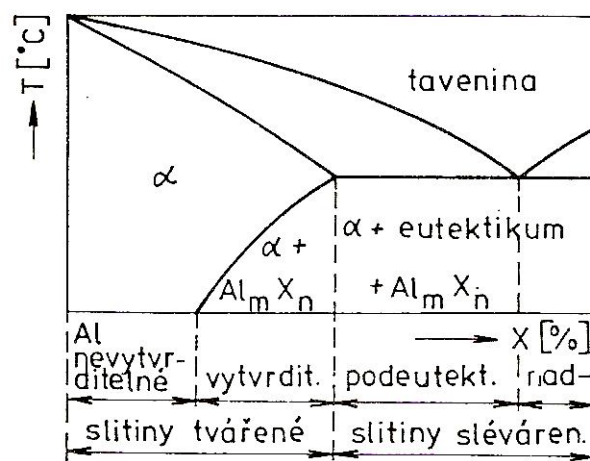
1. Teoretická část

1.1. Slitiny hliníku

Čistý hliník se jako konstrukční materiál nepoužívá zejména z důvodu jeho nízkých mechanických vlastností – pevnosti v tahu pod 100 MPa a tvrdosti 20-30 HB. Oproti tomu slitiny hliníku jsou hned po ocelích druhým nejčastěji používaným konstrukčním materiálem. Nejvíce využívané vlastnosti u těchto slitin jsou nízká měrná hmotnost, dobrá pevnost, odolnost proti korozi zejména na vzduchu a v kyselinách, dobrá tepelná a elektrická vodivost. Nevýhodou je zejména nízká tvrdost a špatná obrobitelnost [1, 2].

1.1.1. Dělení slitin hliníku

Slitiny hliníku se dají dělit podle mnoha kritérií. Například podle způsobu zpracování na slitiny slévárenské, tedy k výrobě hliníkových odlitků, a slitiny určené k tváření. Oba druhy těchto slitin se dělí podle schopnosti k tepelnému zpracování na vytvrditelné a nevytvrditelné, což je vidět na obr. 1. Podle počtu přísadových prvků jsou slitiny binární, ternární a vícesložkové [3, 4].



Obr. 1: Dělení slitin hliníku [4]

1.1.2. Slévárenské slitiny

Slévárenské slitiny oproti slitinám k tváření obsahují více přísadových prvků a mají horší mechanické vlastnosti. Používá se zejména křemík, měď, zinek, hořčík, nikl, mangan a jejich kombinace. Slitiny obsahují eutektikum. Jsou odlévány do písku, kovových forem nebo pod tlakem. Na tom značně závisí hodnoty mechanických vlastností. Nejlepších vlastností se dosahuje litím pod tlakem. Maximální pevnost bývá kolem 250 MPa. Nejdůležitější slévárenskou vlastností slitin je slévatelnost. Pod tímto názvem se skrývá více vlastností důležitých při výrobě odlitků, jsou to zejména zabíhavost, smrštění, vznik trhlin a pórovitost. Zabíhavost slitiny je schopnost dokonalého vyplnění tvaru dutiny formy. Je závislá na teplotě taveniny i formy, rychlosti ochlazování slitiny a také na přítomnosti oxidů ve slitině. Ty se dají odstranit rafinací neboli čištěním taveniny, a tím se zabíhavost zvýší. Zabíhavost se zjišťuje technologickými zkouškami. Jednou z nich je Curyho zkouška zabíhavosti, která spočívá v tom, že nalijeme taveninu do nádoby ve tvaru spirály a změříme délku odlité spirály. Smrštění vzniká po ztuhnutí odlitku a je to objemový úbytek slitiny oproti odlité tavenině. Pro správné rozměry odlitku se musí do formy nalít více taveniny o hodnotu smrštění. Při tomto jevu vznikají v odlitcích pnutí, která se pak dají odstranit tepelným zpracováním. Trhliny v odlitku vznikají při smršťování v důsledku vzniku pnutí. Sklon ke vzniku trhlin se určuje technologickými zkouškami. Například zkouška prstencová spočívá v tom, že se tavenina odlévá do formy prstencovitého tvaru a zjišťuje se délka trhlinek v prstenci. Mechanické vlastnosti jsou závislé na druhu slitiny. Jsou jedním z kritérií výběru materiálu pro daný typ výrobku. U hliníkových slitin sledujeme zejména mez pevnosti, tvrdost a vrubovou houževnatost. Se vzrůstající teplotou mechanické vlastnosti klesají, proto je nevhodné používat slitin hliníku za vysokých teplot. Tepelným zpracováním a vytvrzováním lze mechanické vlastnosti zvyšovat [2, 3].

1.1.2.1. Druhy slévárenských slitin

Slitiny typu Al-Si jsou nazývány siluminy, což je německá obchodní značka. Patří k nejvýznamnějším slitinám. Obsahují 5 až 12 % křemíku plus další prvky například mangan, měď, nikl, hořčík. Siluminy se dále dělí na podeutektické, eutektické a nadeutektické. Každá z těchto slitin má odlišné vlastnosti a tím i jiný druh použití. Tyto slitiny mají velmi dobré slévárenské vlastnosti a jsou dobře odolné proti korozi, ale špatně se obrábějí. Zvýšení

mechanických vlastností lze provést tepelným zpracováním - vytvrzováním, ale pouze u slitin s přísadovým prvkem Mg, Cu nebo Ni.

Slitiny Al-Mg obsahují 3-11 % hořčíku. Mají horší slévárenské vlastnosti, dochází u nich k většímu okysličování a pórovitosti a mají menší zabíhavost. K jejich přednostem patří nízká měrná hmotnost (asi 2500 kg/m³), velmi dobrá odolnost proti korozi i v mořské vodě, dobrá leštitelnost, dobré mechanické vlastnosti (zvláště měrná pevnost a rázová houževnatost). Přidáním křemíku do slitiny lze dosáhnout větší zabíhavosti, ale zvyšuje měrnou hmotnost. Tyto slitiny se pak používají v automobilovém průmyslu např. na žebrované hlavy válců a pro dobrou korozní odolnost i jako kování automobilů.

Slitiny Al-Cu obsahují až 12% mědi. Mají špatné slévárenské vlastnosti, které se zlepšují přidáním křemíku do slitiny. Takto upravené slitiny pak obsahují 5-7% mědi a do 4 % křemíku. Mají velmi dobrou obrobitelnost, ale odolnost proti korozi je u těchto slitin poměrně špatná. Odlitky se pak musí povrchově chránit proti korozi. S obsahem mědi klesá tažnost, ale vzrůstá pevnost až do určitého obsahu mědi. Mechanické vlastnosti se dají dále zvyšovat tepelným zpracováním. Používají se na odlitky, kde je potřebná vysoká pevnost, např. v automobilovém průmyslu na hlavy válců nebo převodové skříně.

Slitiny Al-Zn obsahují do 10 % zinku. Tyto binární slitiny mají špatné slévárenské i mechanické vlastnosti a proto mají malé využití. Legováním těchto slitin jinými prvky se jejich vlastnosti zlepšují. Přidáním křemíku se zlepšují slévárenské vlastnosti a tvrdost. Mechanické vlastnosti se zlepšují legováním hořčíkem a takto upravené slitiny lze ještě vytvrzovat [1, 4, 6].

1.1.3. Tvářené slitiny hliníku

Tvářené slitiny hliníku rozdělujeme podle chemického složení do devíti základních řad podle legujících prvků, viz tab. 1.

Tabulka 1: Rozdělení podle EN 573-1

Hlavní legující prvek	Označení série
Hliník čistoty minimálně 99,00 %	1000
Měď	2000
Mangan	3000
Křemík	4000
Hořčík	5000

Hořčík a křemík	6000
Zinek	7000
Jiné prvky	8000
Nepoužitá skupina	9000

Řada 1000. Je to hliník čistoty minimálně 99,00 %. Je charakterizován vysokou tepelnou a elektrickou vodivostí a dobrou odolností proti korozi. S těmito vlastnostmi se používá hlavně v elektrotechnice a chemickém průmyslu.

Řada 2000. Kromě hlavního legujícího prvku, kterým je měď, se v těchto slitinách nachází i sekundární prvek a to hořčík. Tyto slitiny AlCuMg se nazývají duraly. Lze je dobře tvarovat za tepla i za studena. Při tváření za studena dochází ke zpevnění, které je možno odstranit žíháním. Duraly mají špatnou odolnost proti korozi. Z tohoto důvodu se plechy z těchto slitin plátují fóliemi z hliníku vysoké čistoty nebo ze slitin řady 6000, které mají dobrou odolnost vůči korozi. Pevnost duralů se zvyšuje vytvrzováním.

Řada 3000. Hlavní legující prvek je mangan. Tyto slitiny se nevytvrzují. Můžeme je zpevňovat tvářením za studena. Mají dobrou svařitelnost a korozivzdornost a to i v mořské vodě. Uplatňují se v dopravě a stavebnictví, ale také se používají jako výměníky tepla a v architektuře.

Řada 4000. Hlavním legujícím prvkem je křemík. Nelze je tepelně zpracovávat. Slitiny s obsahem křemíku do 12 % mají dobrou svařitelnost a používají se jako svařecí dráty.

Řada 5000. Hlavní legující prvek je hořčík. Nevytvrzují se z důvodu nízké účinnosti tepelného zpracování. Zpevňovat je lze pouze tvářením za studena. Používají se v potravinářském a lodním průmyslu nebo v architektuře.

Řada 6000. Jsou legovány hořčíkem a křemíkem. Charakteristickými vlastnostmi jsou výborná schopnost k tváření, dobrá svařitelnost a korozivzdornost. Pevnost se zvyšuje vytvrzováním, ale nedosahuje takových hodnot jako jiné vytvrzovatelné slitiny hliníku k tváření. Používají se zejména v dopravním průmyslu, pro výrobu rámců jízdních kol, díly mostních konstrukcí a v přesné mechanice.

Řada 7000. Hlavním legujícím prvkem je zinek. Legováním hořčíkem slitiny získávají vysoké pevnostní vlastnosti. Mají ale špatnou odolnost proti korozi. Tepelným zpracováním lze zvýšit korozivzdornost, ale snižuje se pevnost. Jako ochrana před korozi se slitiny plátují například hliníkem vysoké čistoty. Slitiny se uplatňují v letectví a v automobilovém průmyslu.

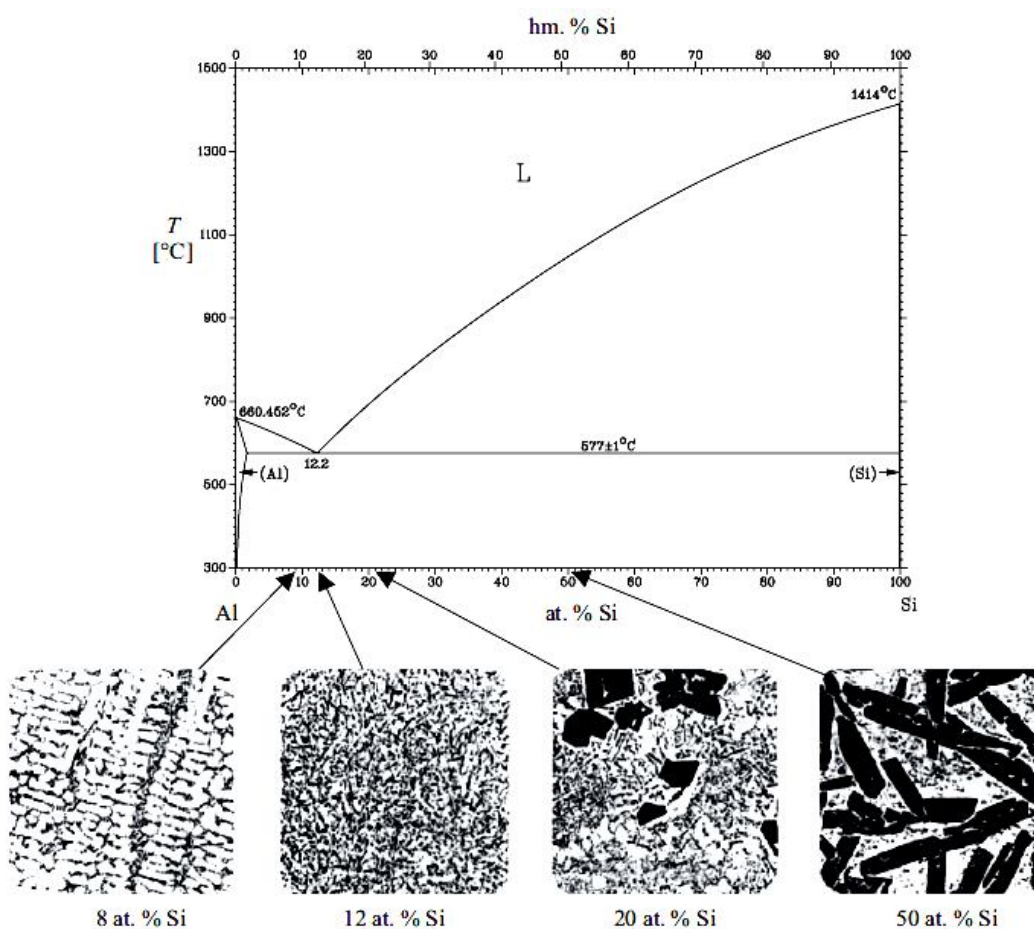
Řada 8000. Slitiny jsou legovány jinými prvky jako železo nebo lithium. Nacházejí použití v leteckém průmyslu nebo pro výrobu výměníků tepla.

Řada 9000. Tato řada je prozatím neobsazená [1].

1.2. Struktura a vlastnosti siluminů

Binární siluminy

Jsou to slitiny typu Al-Si a dělí se na tři skupiny podle obsahu křemíku na podeutektické, eutektické a nadeutektické. Každý druh této slitiny má své specifické použití. Digram soustavy hliník křemík je znázorněn na obr. 2, kde je dokumentována i struktura daných složení.



Obr. 2: Diagram Al-Si [1]

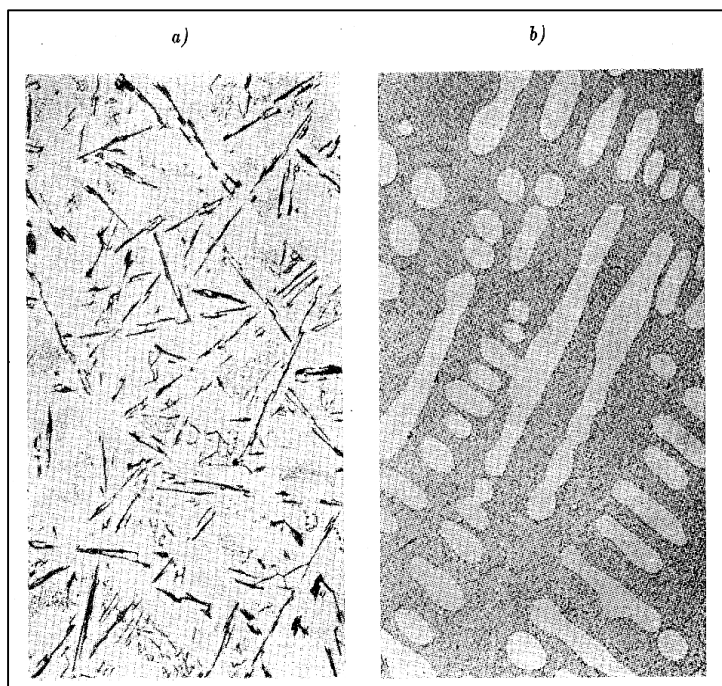
Podeutektické siluminy obsahují pod 11,7 hm. % Si a používají se zejména pro výrobu odlitků středně namáhaných nebo nenamáhaných. Jejich struktura je tvořena primární fází $\alpha(\text{Al})$ a eutektikem. Eutektické slitiny obsahují přibližně 11,7 hm. % Si. Eutektikum je tvořeno směsí tuhého roztoku α a fáze β , kterou tvoří krystaly téměř čistého křemíku.

Z eutektických slitin se vyrábí tvarově komplikované a tenkostěnné odlitky. Nadeutektické slitiny obsahují od 11,7 do 24 hm. % Si a jejich struktura obsahuje částice primárního křemíku. Používají se díky svému nízkému součiniteli tepelné roztažnosti pro odlévání pístů spalovacích motorů. Binární siluminy mají výborné slévárenské vlastnosti, a to hlavně díky křemíku. K jejich vlastnostem patří i dobrá korozivzdornost. Binární siluminy se používají jako hliníkové pájky například AlSi5 nebo AlSi12 [1, 2, 3].

1.3. Způsoby zvyšování mechanických vlastností siluminů

1.3.1. Modifikace

Vlastnosti siluminů se dají výrazně zlepšit tzv. modifikací. Modifikací slitin se změní struktura, zejména velikost a tvar krystalů křemíku, a tím i vlastnosti slitiny. Slitina se modifikuje malým množstvím alkalických kovů. Používá se hlavně sodík a stroncium. Modifikace sodíkem se provádí tak, že se malé množství kovového sodíku 0,05 – 0,1 % zabaleného do hliníkové fólie (alobalu), nebo ve formě patrony z tenkého hliníkového plechu vloží do taveniny při teplotě 750-760 °C . Po uplynutí doby asi 10 minut se slitina odlévá. Rozdíly ve struktuře před a po modifikaci jsou vidět na obr. 3. Tato metoda je rychlá a levná, ale dochází při ní k zásadním nevýhodám jako naplynění taveniny, zvýšené pórovitosti, nerovnoměrnému rozložení sodíku.



Obr. 3: Vliv modifikace slitiny Al-Si 13 na charakter mikrostruktury (zvětšeno 100 krát) [4]

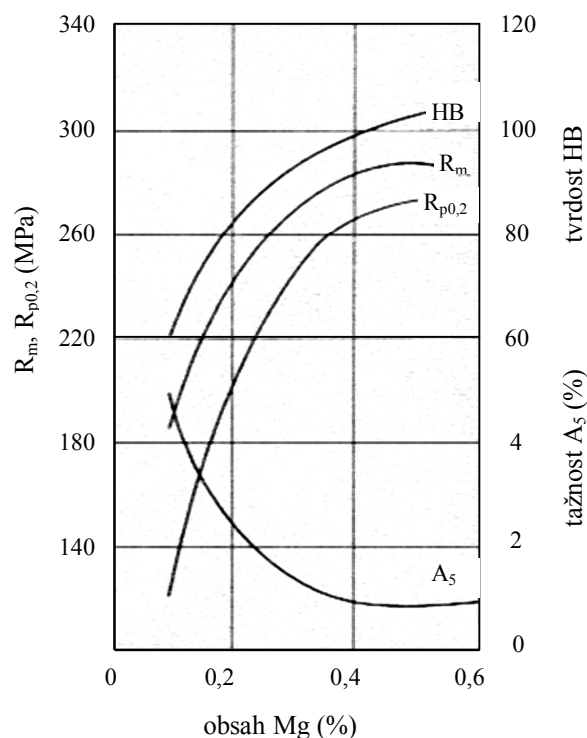
a) Struktura před modifikací

b) struktura po modifikaci

Další způsob je modifikace solemi, které uvolňují sodík. Nejčastěji se používá solí na bázi NaCl-KCl-NaF a to ve formě prášku nebo tablety. Modifikace probíhá tak, že se tableta ponoří do lázně. Po 5-10 minutách proběhne reakce a lázeň se zamíchá. Produkty reakce vyplavou na povrch a poté se musí stáhnout. Po stažení je tavenina připravená k lití. Druhým prvkem nejčastěji používaným pro modifikování je stroncium. Stroncium se do taveniny přidává ve formě předslitiny, nejčastěji se jedná o AlSi13Sr10 , AlSi16Sr10 , AlSr5 a AlSr10 . Předslitiny jsou dodávány ve formě tyčí. Do taveniny se vhodí požadované množství předslitiny. Množství se určuje podle množství stroncia, které obsahuje a které potřebujeme k modifikaci. Je závislé na obsahu křemíku ve slitině a rychlosti ochlazování. Při vložení předslitiny je nutné zajistit promíchání taveniny, aby došlo rychleji k modifikaci v celém objemu [1, 2, 3].

1.3.2. Legování siluminů

Další způsob zlepšování vlastností siluminů je legování slitin různými prvky. Jedním z přísadových prvků je měď. Slitiny Al-Si-Cu jsou nejvíce používané slévárenské slitiny. Uplatňují se hlavně v automobilovém průmyslu. Obsahují 6-14 % křemíku a 1-5 % mědi. S touto přísadou dochází ke změně vlastností oproti binárním siluminům. Z hlediska odlévání mají slitiny menší sklon k naplynění a smršťení při tuhnutí odlitku. Z hlediska mechanických vlastností získávají slitiny větší pevnost a tvrdost. Díky přítomnosti mědi dochází k vytvrzování odlitků bez tepelného zpracování, ale konečné vlastnosti získává odlitek až po několika dnech. Slitiny také získávají lepší obrobiteľnosť. Jednou z nejpoužívanějších slitin je AlSi8Cu3 . Používá se na výrobu dílů a součástí automobilů. Její mechanické vlastnosti jsou v odlitém stavu: $R_m = 170 \text{ MPa}$, $R_{p0,2} = 100 \text{ MPa}$, $A = 1 \%$, $HBS = 75$. Měď má také nežádoucí vliv na vlastnosti a to snížení odolnosti proti korozi. Druhým přísadovým prvkem je hořčík. Slitina obsahuje 0,25-0,45 hm % hořčíku. Tyto slitiny lze vytvrzovat. Získávají větší pevnost a tvrdost, ale klesá tažnosť. Se vzrůstající tvrdostí také roste obrobiteľnosť. Vliv hořčíku na mechanické vlastnosti je vidět na obr. 4. Slitiny můžeme rozdělit podle obsahu křemíku na dva druhy. Slitiny AlSi7Mg a AlSi10Mg . Díky vysokým mechanickým vlastnostem se slitiny používají na namáhané odlitky v automobilovém a leteckém průmyslu.



Obr. 4: Vliv obsahu hořčíku na mechanické vlastnosti slitiny Al-Si 9 po vytvrzení [2]

AlSi7Mg

Ke slitinám tohoto typu patří například AlSi7Mg0,3. Tato slitina se vyznačuje vysokou pevností, dobrými vlastnostmi pro odlévání a dobrou korozivzdorností. Vytvrzování se skládá z rozpouštěcího žíhání při teplotách 530-535 °C s výdrží až 12 hodin a umělého stárnutí při 150-160 °C s výdrží 3-5 hodin. Slouží pro výrobu odlitků, kde se uplatňuje vysoká pevnost, tažnost a houževnatost jako jsou odlitky kol osobních automobilů, díly v leteckém a automobilovém průmyslu. Další slitinou je například AlSi7Mg0,6. Má podobné vlastnosti jako AlSi7Mg0,3 ale vyznačuje se nejvyššími mechanickými vlastnostmi u slitin typu Al-Si.

AlSi10Mg

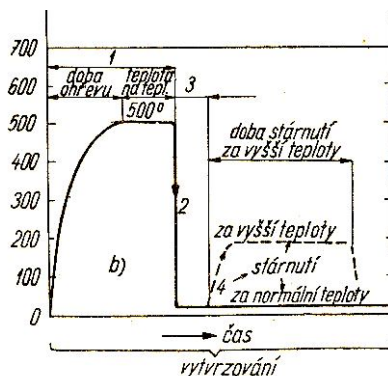
Obsah křemíku se blíží eutektickému a tím se zvyšují i slévárenské vlastnosti proti slitinám AlSi7Mg. Obsahují malé množství škodlivých prvků. Slitiny mají po vytvrzení velmi dobré mechanické vlastnosti zejména obrobitelnost a odolnost proti korozi. Používají se pro tenkostěnné odlitky, jako jsou klikové skříně či brzdové čelisti. Využívá se vysoké pevnosti a houževnatosti [1, 2, 3].

1.4. Tepelné zpracování hliníkových slitin

Tepelné zpracování se provádí z důvodů dosažení vlastností, které požadujeme nebo potřebujeme. Například pro zvýšení mechanických vlastností, odstranění pnutí, odstranění zpevnění po tváření nebo dosažení měkkého stavu. Využívá se žihání a vytvrzování. Mezi žihání patří žihání na měkko, které slouží pro odstranění zpevnění po tváření za studena, nebo odstranění zpevnění po vytvrzování. Dalším způsobem je žihání na odstranění vnitřních pnutí, které používáme u odlitků po ztuhnutí a homogenizační žihání, jehož cílem je rovnoměrná struktura slitiny [2, 3].

1.4.1. Vytvrzování

Nejčastějším druhem tepelného zpracování je vytvrzování. Vytvrzovat můžeme jen slitiny vhodné k tomuto tepelnému zpracování. Slitiny musí obsahovat legující prvky umožňující vytvrzení, kterými bývají hořčík a měď, ale mohou to být i zinek nebo nikl. Prvky se vyznačují výraznou změnou rozpustnosti na teplotě v tuhém roztoku $\alpha(\text{Al})$ a to je hlavním předpokladem pro vznik přesyceného tuhého roztoku. Slitiny musí mít chemické složení pod segregační čarou. Proces vytvrzování se skládá ze tří částí: rozpouštěcího žihání, rychlého ochlazení a stárnutí, což je vidět na obr. 5. Při rozpouštěcím žihání ohřejeme polotovar na takovou teplotu, při které se legující prvky rozpustí do tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})$. Teplota ohřevu nesmí být vyšší než teplota solidu, aby se slitina nezačala tavit, tím by došlo k znehodnocení materiálu.



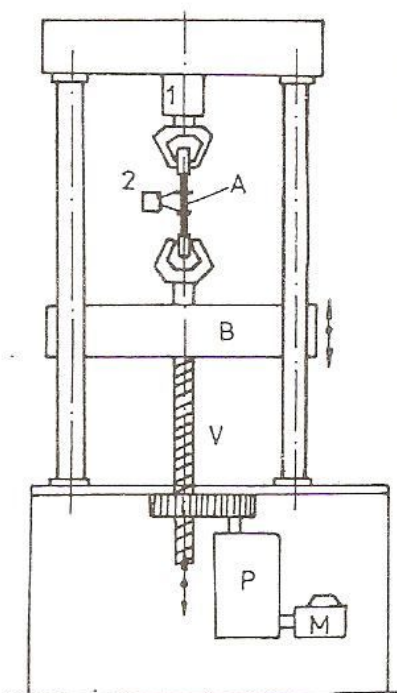
Obr. 5: Sled operací při vytvrzování hliníkových slitin [3]

Dalším krokem je rychlé ochlazení tzv. zakalení. Ochlazovacím médiem je nejčastěji voda. Při zakalení vznikne přesycený tuhý roztok při normální teplotě okolí. Doba od vytažení slitiny z pece do ochlazení musí být co nejkratší, aby nedocházelo k rozpadu tuhého roztoku. Po ochlazení je slitina měkká a dobře tvárná, což se využívá například při tažení nebo ohýbání. Následuje stárnutí, při kterém dochází k rozpadu přesyceného tuhého roztoku. Tím dochází ke změnám ve struktuře, což má za následek změnu mechanických vlastností. U některých slitin k tomu dochází již při teplotě okolí a tento pochod se nazývá přirozené stárnutí. Umělé stárnutí se provádí při zvýšené teplotě. Dlouhá doba nebo vysoká teplota při procesu vede k přestárnutí slitiny. Při přestárnutí klesá tvrdost [1, 2, 3].

2. Použité experimentální metody

2.1. Tahová zkouška

Tato zkouška patří mezi zkoušky základních mechanických vlastností. Jedná se o statickou zkoušku při jednoosé napjatosti a pokojové teplotě. Je realizována na univerzálním zkušebním stroji, jehož schéma je vidět na obr. 6. Zjišťovanými vlastnostmi jsou mez pevnosti, mez kluzu, tažnost a kontrakce. Pevnost je charakterizována jako schopnost materiálu odporovat deformaci a porušení. Mez pevnosti je největší zatížení, které zkušební vzorek snese před porušením. Mez kluzu je napětí, při kterém se elastické deformace mění na plastické. Tažnost a kontrakce jsou charakteristiky, kterými můžeme vyjádřit plastické vlastnosti materiálu [4,5].



Obr. 6: Schéma univerzálního zkušebního stroje (1-dynamometr, 2-průtahoměr, A-vzorek, B-pohyblivý příčník, M-motor, V-vřeteno, P-převodová skříň) [5]

2.2. Tvrdost

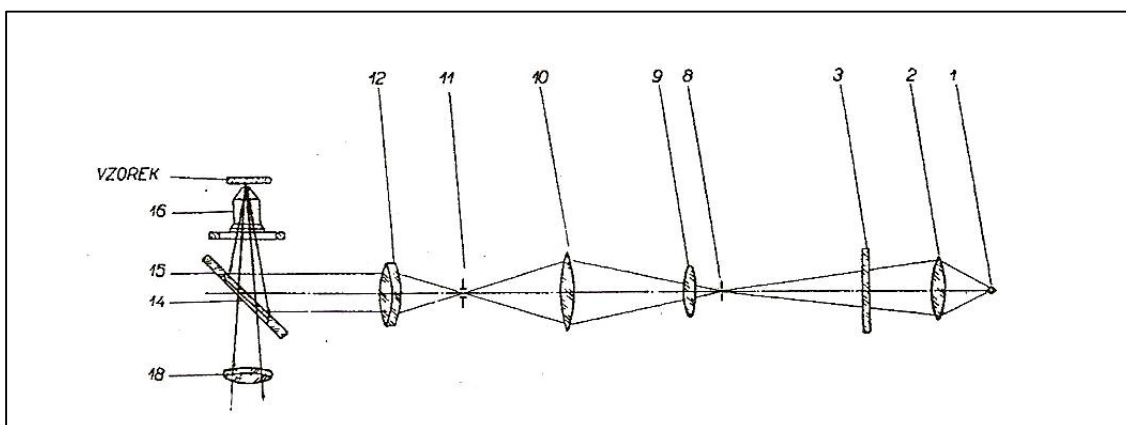
Tvrdost je vlastnost materiálu udávající odolnost proti vniknutí cizího tělesa. Vnikací zkouška podle Brinella je založena na principu vlačování indentoru do materiálu určitou silou a následném vyhodnocení tvrdosti z rozměrů vtisku. Vnikacím tělesem je kulička. Na obr. 7 je Brinellův tvrdoměr, který je používán pro měkké materiály [4,5].



Obr. 7: Brinellův tvrdoměr

2.3. Optická mikroskopie

Metalografická analýza zahrnuje zkoumání struktury připravovaného metalografického výbrusu. Slouží hlavně k získání informací o druhu a povaze struktury, tedy o velikosti a tvaru zrn a druhu fází. K pozorování se využívá světelná mikroskopie, která je založena na pozorování viditelným světlem. Průchod světelných paprsků mikroskopem je zobrazen na obr. 8. Nejčastěji se využívá pozorování ve světlém poli, kde se plošky kolmé k ose, na nichž se světelné paprsky odrážejí, jeví světlé a prohlubně a rýhy, z nichž se paprsky odrážejí mimo objektiv, se jeví tmavé. Připravený výbrus vložíme pod mikroskop, kde s potřebným zvětšením lze pozorovat strukturu i vady v materiálu [4,5].



Obr. 8: Schéma průchodu světelných paprsků v metalografickém mikroskopu při pozorování ve světlém poli: 1-zdroj světla, 2-kolektor, 3-tepelný filtr, 8-aperturní clona, 9,10,12-čočky osvětlovací soustavy, 11-polní clona, 14-planparalelní sklíčko, 15-kruhové zrcadlo, 16-objektiv, 18-achromatická čočka objektivu [5]

3. Experiment – výsledky

3.1. Použitá slitina a použité tepelné zpracování

3.1.1. Slitina AlSi7Mg0,3

Pomocí spektrální analýzy ve firmě Unitherm na přístroji SPECTROCAST bylo zjištěno chemické složení slitiny AlSi7Mg0,3. Měření bylo provedeno na vzorku, zobrazeném na obr. 6. Výsledky měření jsou zpracovány v tabulce 2. Z tabulky vyplývá, že průměrné hodnoty obsahu prvků ve slitině odpovídají minimálním a maximálním požadavkům na složení slitiny.



Obr. 9: Vzorek pro spektrální analýzu

Tabulka 2: Výsledky spektrální analýzy

	1	2	3	4	5	6	min	průměr	max
Si	7,34	7,45	7,45	7,36	7,36	7,38	6,50	7,39	7,50
Fe	0,173	0,173	0,175	0,173	0,173	0,175		0,174	0,190
Cu	0,013	0,014	0,012	0,012	0,012	0,012		0,013	0,050
Mn	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02		0,02	0,10
Mg	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,25	0,35	0,45
Zn	0,013	0,015	0,012	0,011	0,011	0,011		0,012	0,070
Ni	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	
Cr	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003		0,003	
Pb	<0,000	<0,000	<0,000	<0,000	<0,000	<0,000		<0,002	
Sn	0,007	0,007	0,006	0,006	0,006	0,006		0,006	
Ti	0,153	0,153	0,150	0,151	0,152	0,152	0,080	0,152	0,250
Ca	0,0008	0,0009	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008		0,0008	0,0300
Na	0,0048	0,0049	0,0048	0,0050	0,0048	0,0046		0,0048	
Sr	<0,000	<0,000	<0,000	<0,000	<0,000	<0,000		<0,001	
Zr	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001		0,001	0,030
Al	91,93	91,80	91,81	91,91	91,91	91,88		91,87	

3.1.2. Tepelné zpracování slitiny AlSi7Mg0,3

Slitina byla tepelně zpracovávána ve firmě Unitherm. Zkoušky probíhaly dle tabulky 3. Na každou konfiguraci bylo použito 7 vzorků, z nichž 5 bylo určeno na měření a dva náhradní. Konfigurace označuje podmínky tepelného zpracování, tedy teplotu a dobu umělého stárnutí vzorků.

Tabulka 3: Rozpis zkoušek tepelného zpracování

Číslo zkoušky (konfigurace)	Teplota rozpuštěcího žihání [°C]	Doba rozpuštěcího žihání [h]	Teplota umělého stárnutí [°C]	Doba umělého stárnutí [h]
1	535	7	150	2
2	535	7	150	3
3	535	7	150	4
4	535	7	150	5
5	535	7	160	2
6	535	7	160	3
7	535	7	160	4
8	535	7	160	5

Vlastní tepelné zpracování probíhalo v laboratoři Unithermu. Připravené vzorky, odlévané do písku, byly nejprve vsazeny do první pece, kde probíhalo rozpouštěcí žíhání, a to vždy při teplotě 535 °C na 7 hodin. Po uplynutí dané doby bylo připraveno ochlazovací médium (voda), která měla teplotu 40 ± 1 °C. Vzorky byly co nejrychleji vytaženy z pece do přípravku, z něhož byly ihned zakaleny. Po ochlazení byly vzorky umístěny do druhé pece, kde probíhalo vytvrzování dle podmínek uvedených v tabulce 3. Po vytvrzení byly tyčky vytáhnuty z pece a ochlazování probíhalo na vzduchu. Další měření již probíhalo v laboratořích Technické univerzity v Liberci.

3.2. Výsledky tahové zkoušky

3.2.1. Průběh měření

Tahová zkouška byla prováděna na univerzálním zkušebním zařízení FP100 – Lab Test II. Zkušební vzorky ve tvaru tyček o průměru 12 mm byly označeny ryskami a změřeny jejich vzdálenosti. Označená tyčka byla upnuta do upínacího zařízení. Po spuštění stroje narůstala síla až do přetržení vzorku. Po změření prodloužení počítač vyhodnotil požadované charakteristiky. Výsledky jsou zpracovány v tabulce 4.

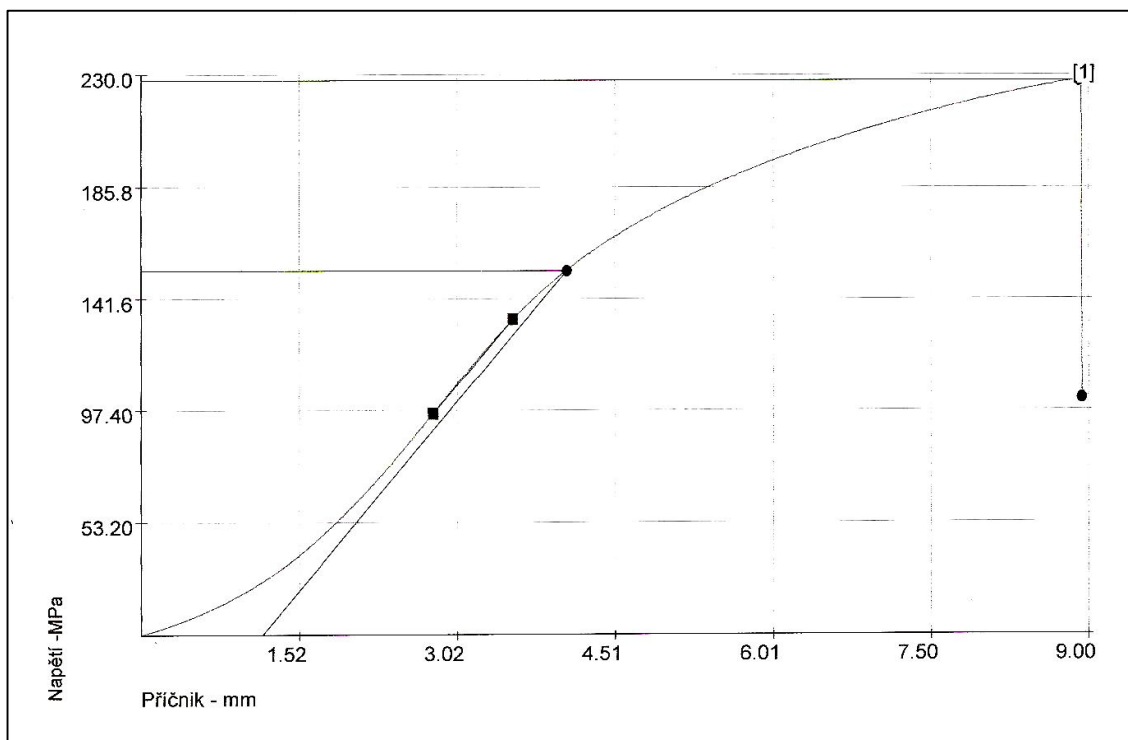
3.2.2. Naměřené výsledky

Tabulka 4: výsledky tahové zkoušky

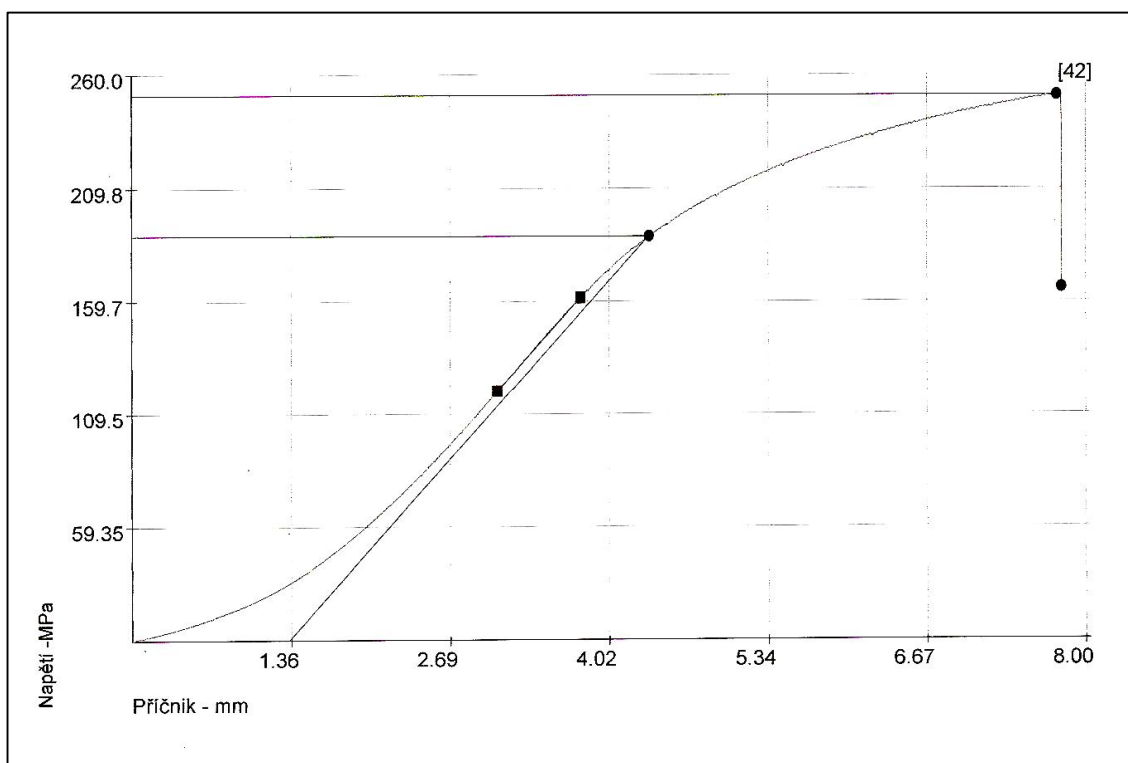
Číslo vzorku	Teplota rozp. Žíhání [°C]	Doba rozp. Žíhání [h]	Teplota umělého stárnutí [°C]	Doba umělého stárnutí [h]	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Smluvní mez kluzu [MPa]	Tažnost [%]
1	535	7	150	2	227,83	152,62	5,02
2					223,58	152,19	4,51
3					226,20	153,94	4,41
4					225,08	149,22	5,19
5					245,60	153,50	7,18
Průměr					229,658	152,294	5,262
1	535	7	150	3	242,20	165,12	5,19
2					227,61	160,31	3,91
3					244,76	157,53	5,14
4					239,32	165,81	4,94
5					233,23	153,00	3,51
Průměr					237,424	160,354	4,538
1					237,14	170,06	2,72

2	535	7	150	4	245,64	174,62	5,78
3					238,32	170,43	4,39
4					239,48	171,12	4,97
5					240,70	169,37	4,56
Průměr					240,256	171,12	4,484
1	535	7	150	5	259,23	174,99	5,30
2					238,54	188,65	2,78
3					239,04	177,90	4,39
4					238,20	170,34	3,38
5					254,42	182,40	5,49
Průměr					245,886	178,856	4,268
1	535	7	160	2	235,14	172,84	4,70
2					219,86	163,28	3,03
3					228,70	154,15	5,43
4					232,20	159,47	4,60
5					249,76	176,31	5,09
Průměr					233,132	165,21	4,57
1	535	7	160	3	236,26	173,46	4,09
2					257,70	174,93	7,23
3					236,83	172,78	3,68
4					247,67	174,62	4,60
5					227,20	166,81	2,92
Průměr					241,132	172,52	4,504
1	535	7	160	4	247,48	185,02	3,70
2					245,29	185,15	4,80
3					245,01	179,65	4,44
4					246,64	183,24	3,91
5					250,10	178,18	5,24
Průměr					246,904	182,248	4,418
1	535	7	160	5	253,45	191,05	3,48
2					247,32	185,90	3,37
3					253,04	192,40	4,16
4					255,73	203,24	3,04
5					250,89	188,62	4,32
Průměr					252,086	192,242	3,674

3.2.3. Protokoly o zkoušce tahem - příklady



Obr. 10: protokol o zkoušce tahem – číslo vzorku 1 – 150 °C , 2 hod



Obr. 11: protokol o zkoušce tahem – číslo vzorku 5 – 160 °C , 5 hod

3.3. Výsledky měření tvrdosti

3.3.1. Průběh měření

Zkouška byla prováděna na Brinellově tvrdoměru (viz obr. 7) se zatížením 62,5 kP. Vzorek byl zatížen přibližně na 60 sekund. Na přístroji byl změřen průměr vtisku a pomocí tabulek vyhodnocena tvrdost. Výsledky jsou zpracovány v tabulce 5.

3.3.2. Naměřené výsledky

Tabulka 5: Výsledky měření tvrdosti

Číslo vzorku	Teplota rozp. Žihání [°C]	Doba rozp. Žihání [h]	Teplota umělého stárnutí [°C]	Doba umělého stárnutí [h]	Naměřená tvrdost					Průměrná hodnota [HB]	Celková průměrná hodnota [HB]
					[HB]						
1	535	7	150	2	89	93	91	89	89	90,2	89,56
2					87	87	89	89	87	87,8	
3					87	89	89	87	93	89	
4					91	91	91	89	91	90,6	
5					91	91	89	89	91	90,2	
1	535	7	150	3	89	93	91	95	93	92,2	92,4
2					89	91	91	93	93	91,4	
3					93	93	95	93	91	93	
4					91	91	91	93	93	91,8	
5					95	93	93	95	93	93,8	
1	535	7	150	4	95	95	93	93	93	93,8	94,44
2					95	95	95	97	95	95,4	
3					95	95	95	95	97	95,4	
4					95	93	93	93	95	93,8	
5					93	95	93	95	93	93,8	
1	535	7	150	5	95	95	93	93	95	94,2	95,72
2					95	95	95	95	95	95	
3					91	95	97	97	97	95,4	
4					95	97	97	97	97	96,6	
5					99	97	97	97	97	97,4	
1	535	7	160	2	89	91	91	91	91	90,6	91,24
2					91	93	93	91	91	91,8	
3					91	91	93	95	91	92,2	
4					91	91	93	93	93	92,2	
5					91	89	89	89	89	89,4	
1	535	7	160	3	93	93	95	95	95	94,2	93,56
2					95	95	93	93	93	93,8	
3					93	93	95	95	93	93,8	
4					93	93	93	95	93	93,4	

5					93	91	93	93	93	92,6	
1	535	7	160	4	97	97	97	95	95	96,2	95,4
2					95	95	95	93	95	94,6	
3					95	93	95	93	95	94,2	
4					95	95	97	97	97	96,2	
5					97	97	95	95	95	95,8	
1	535	7	160	5	93	93	95	97	95	94,6	97,08
2					97	99	99	99	99	98,6	
3					102	97	99	99	99	99,2	
4					99	93	93	95	95	95	
5					102	97	97	97	97	98	

3.4. Metalografie

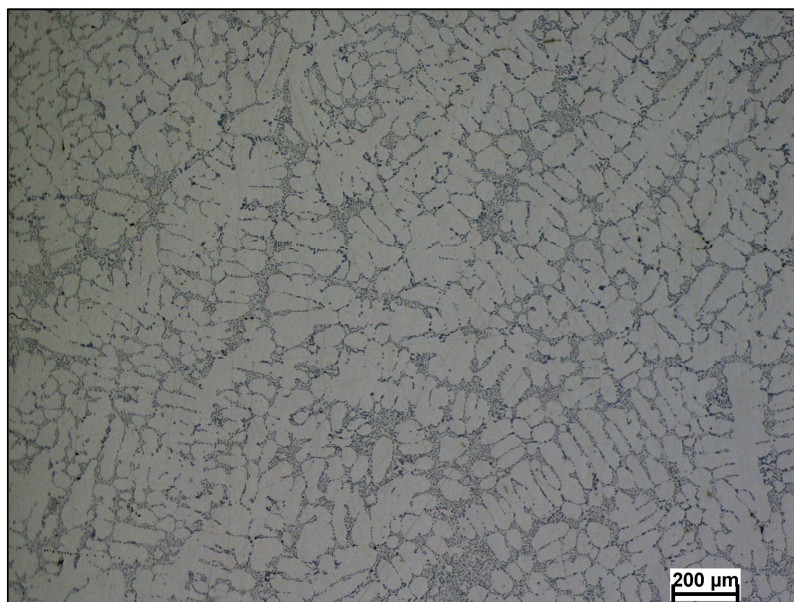
3.4.1. Příprava vzorků

Výbrusy byly připravovány v laboratoři TUL. Vzorky šířky přibližně 5 mm byly nejdříve odděleny od tyček na rozbrušovací pile DELTA Abrasimet Cutter od firmy Buehler. Dále byly označeny a pomocí přístroje Simplimet 100 zalisovány do dentakrylu. Zalisované vzorky byly broušeny a leštěny na metalografické brusce BUEHLER PHOENIX BETA. Při broušení byl použit brusný papír drsnosti 320 nm a na chlazení voda. U leštění byly použity kotouče 9, 3 a 1 μm bez chlazení vodou, ale za přítomnosti leštící suspenze příslušné danému kotouči. Pro zviditelnění struktury nebylo použito žádné leptadlo. Vzorky byly analyzovány v leštěném stavu.

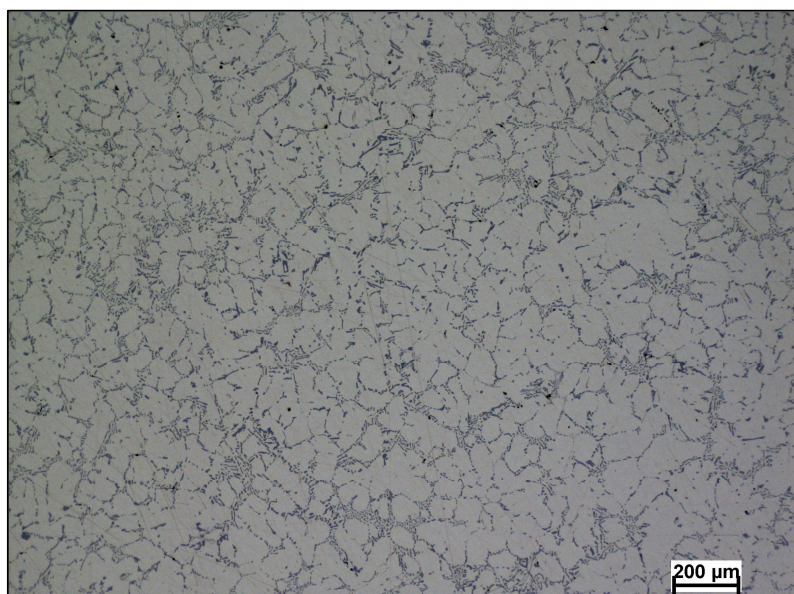
3.4.2. Metalografie – výsledky

Struktura byla pozorována na světelném mikroskopu Nikon EPIPHOT 200 za pomoci programu NIS-Elements AR 3.1. Struktury jsou na obrázcích 12 až 19.

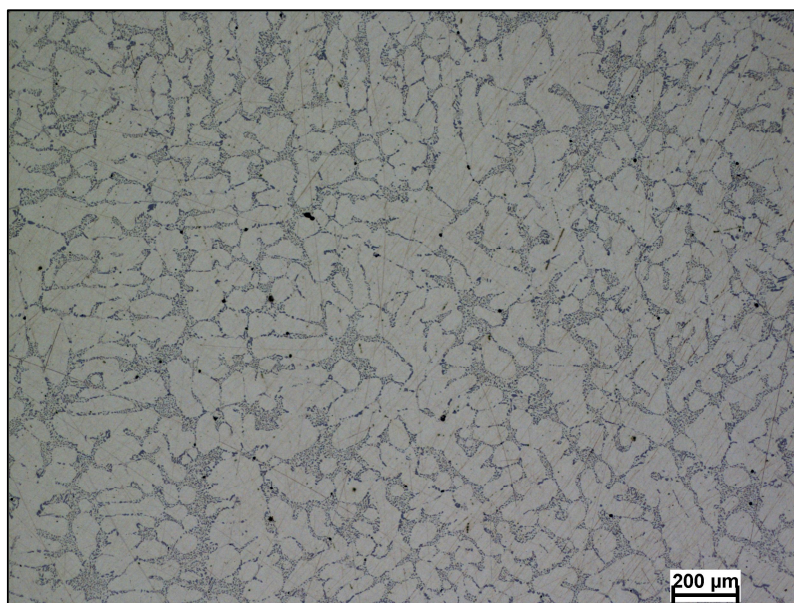
Struktura je tvořena sítí primárních dendritů fáze α (Al) v podobě bílých útvarů a eutektikem vylučovaným v mezidendritických prostorech v podobě šedých útvarů, které je tvořeno fází α (Al) a čistým přísadovým prvkem, tedy křemíkem. [2,7]



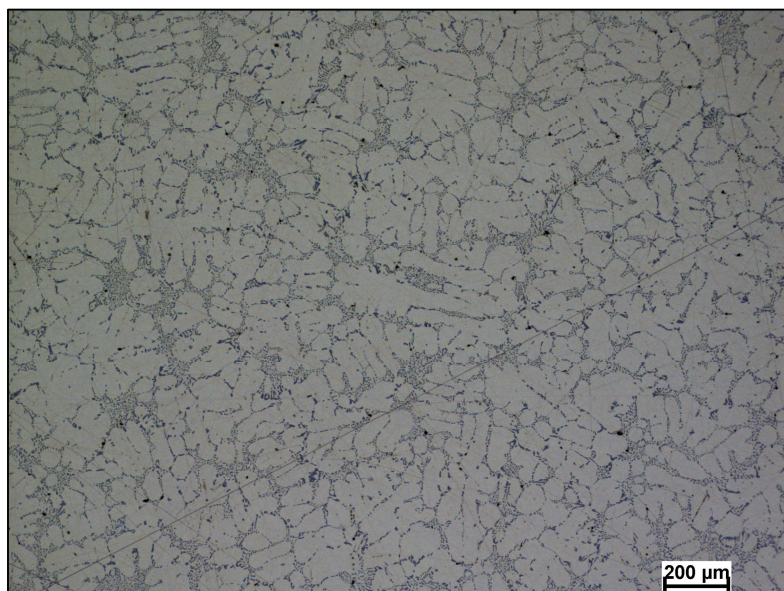
Obr. 12: Struktura konfigurace 1(viz tab. 3) – zvětšení 50x



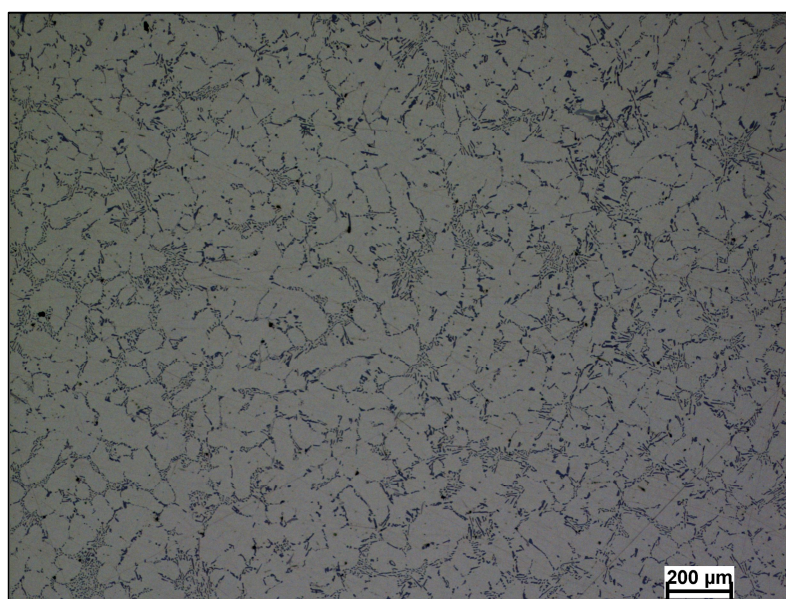
Obr. 13: Struktura konfigurace 2 (viz tab. 3) – zvětšení 50x



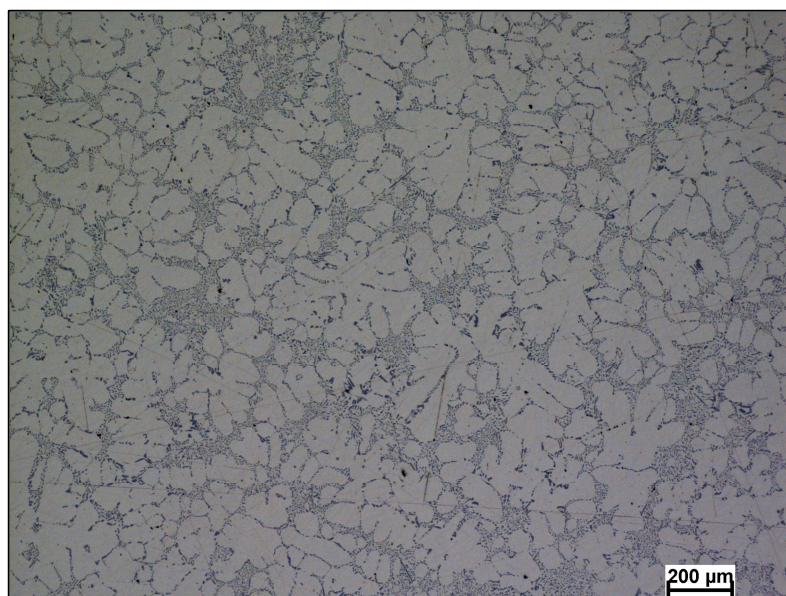
Obr. 14: Struktura konfigurace 3 (viz tab. 3) – zvětšení 50x



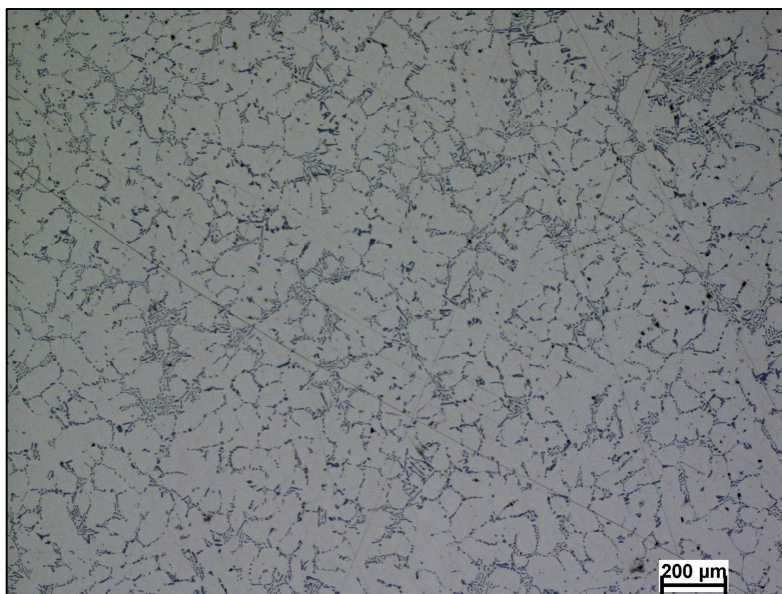
Obr. 15: Struktura konfigurace 4 (viz tab. 3) – zvětšení 50x



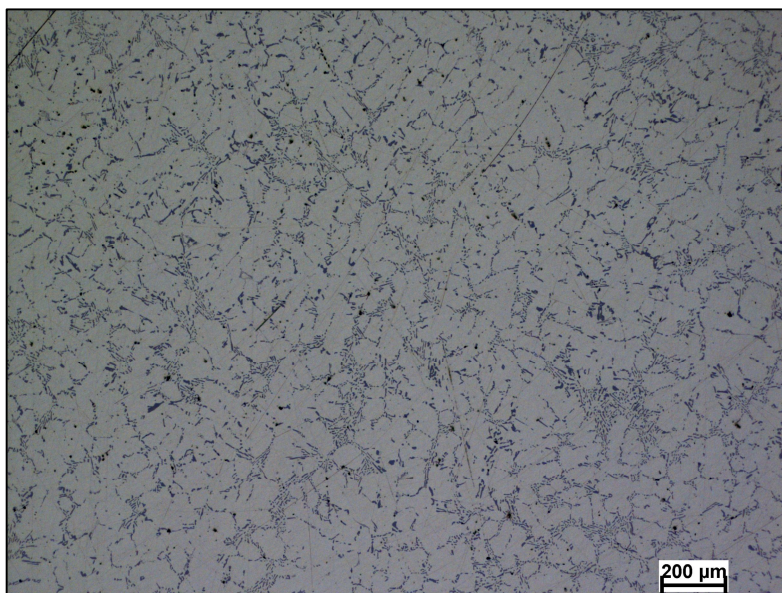
Obr. 16: Struktura konfigurace 5 (viz tab. 3) – zvětšení 50x



Obr. 17: Struktura konfigurace 6 (viz tab. 3) – zvětšení 50x



Obr. 18: Struktura konfigurace 7 (viz tab. 3) – zvětšení 50x

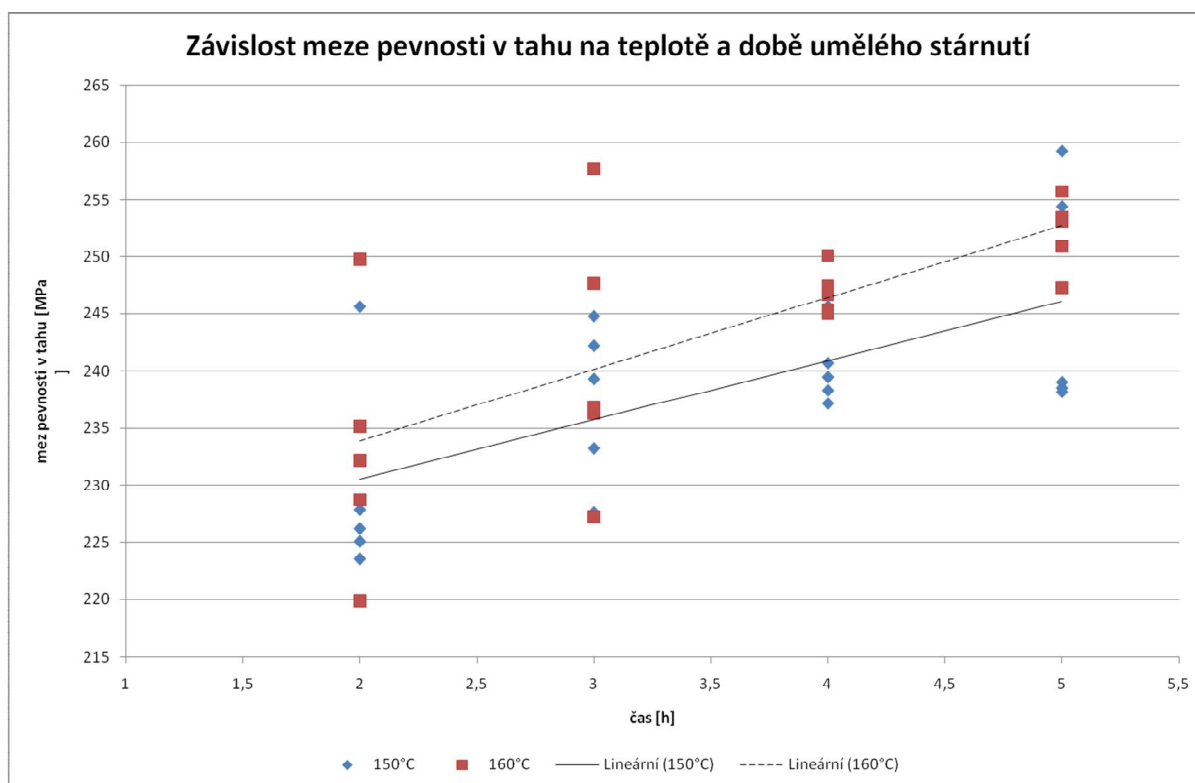


Obr. 19: Struktura konfigurace 8 (viz tab. 3) – zvětšení 50x

4. Diskuse

4.1. Zjištěné závislosti

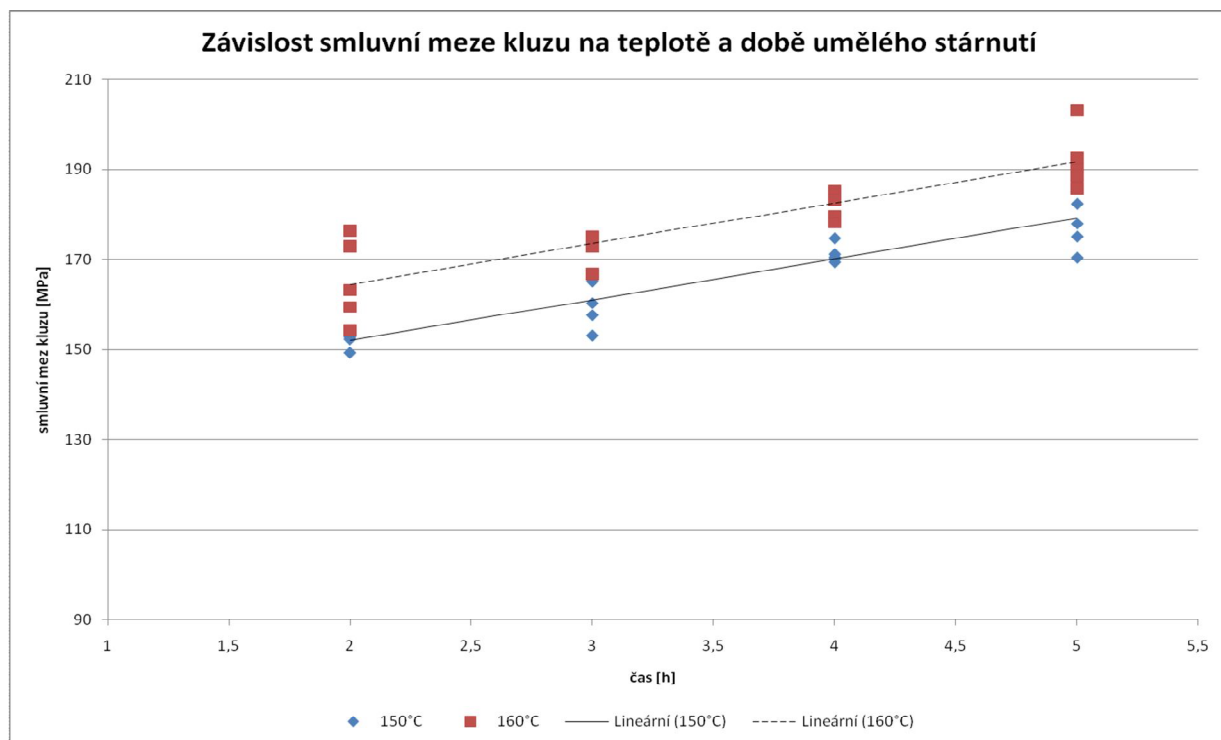
4.1.1. Závislost meze pevnosti v tahu na teplotě a době umělého stárnutí



Obr. 20: Závislost meze pevnosti v tahu na teplotě a době umělého stárnutí

Graf na obr. 20 popisuje závislost meze pevnosti v tahu na teplotě a době umělého stárnutí. Hodnoty jednotlivých konfigurací jsou proloženy přímkovou spojnicí trendu, která má vzestupný charakter. Z grafu je patrné, že mez pevnosti se zvyšuje s rostoucí teplotou umělého stárnutí. Zvýší-li se teplota umělého stárnutí, proces stárnutí se urychlí a hodnoty pevnosti při stejných časech jsou vyšší. Nejvyšší hodnoty jsou tedy při konfiguraci 8 s teplotou 160°C a dobou umělého stárnutí 5 hodin. Jednotlivé odchylky v grafu mohou být způsobeny řadou faktorů. Jedním je metoda zpracování odlitků. Jedná se o technologii gravitačního lití do pískové formy. Materiál nemusí být homogenní v celém objemu. Mohou se vyskytovat vnitřní vady, které mají vliv na mechanické vlastnosti.

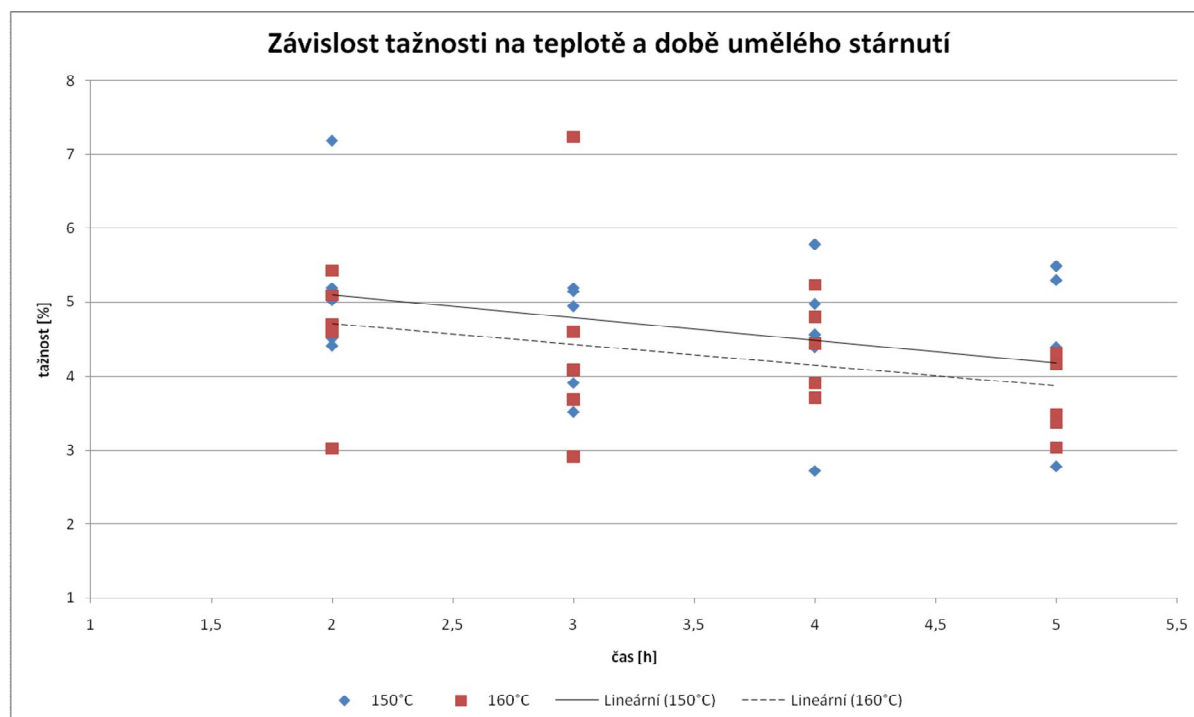
4.1.2. Závislost smluvní meze kluzu na teplotě a době umělého stárnutí



Obr. 21: Závislost smluvní meze kluzu na teplotě a době umělého stárnutí

V grafu na obr. 21 je znázorněna závislost smluvní meze kluzu na teplotě a době umělého stárnutí. Hodnoty jsou proloženy přímkovou spojnicí trendu s vzestupným charakterem. Smluvní mez kluzu je tím větší, čím je umělé stárnutí delší. Vyšší teplota urychluje proces stárnutí a zvyšuje mez kluzu. Nejvyšších hodnot se opět dosahuje při tepelném zpracování odpovídající konfiguraci 8. Výchyly mohou být způsobeny metodou odlévání.

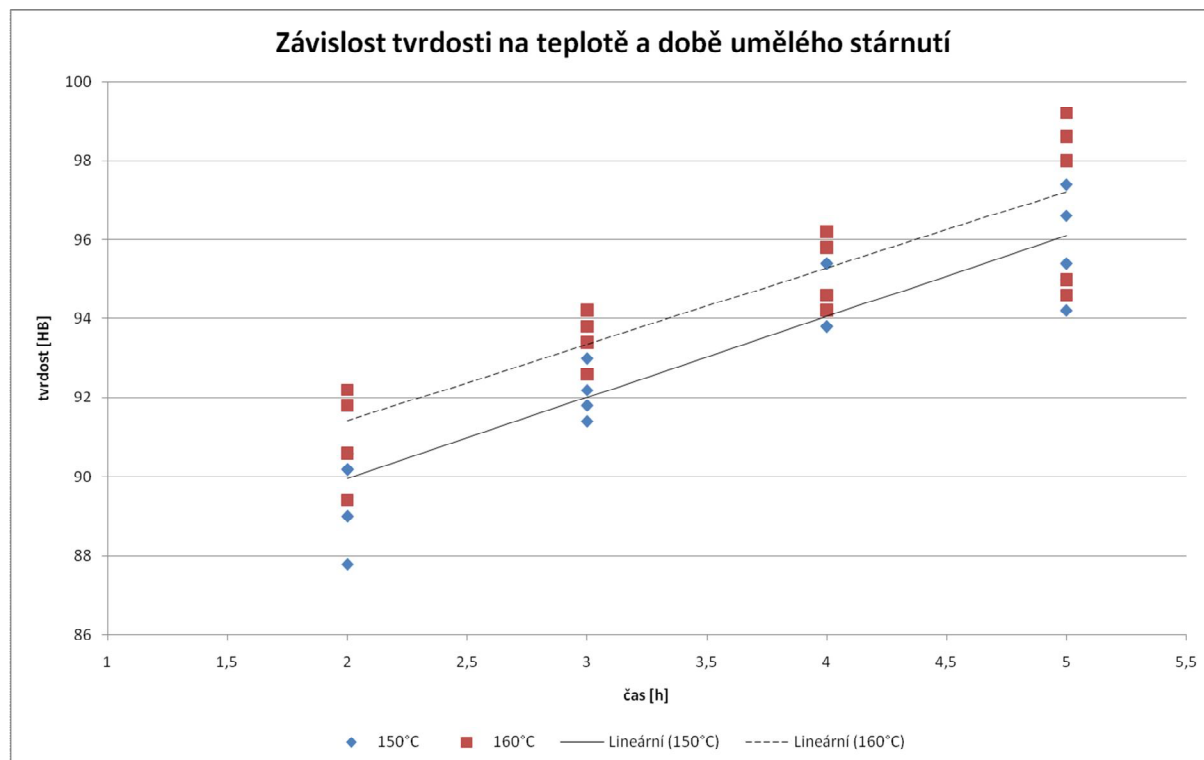
4.1.3. Závislost tažnosti na teplotě a době umělého stárnutí



Obr. 22: Závislost tažnosti na teplotě a době umělého stárnutí

V grafu na obr. 22 je znázorněna závislost tažnosti na teplotě a době umělého stárnutí. Hodnoty jsou proloženy přímkovou spojnici trendu se sestupným charakterem. Tažnost s rostoucí dobou umělého stárnutí klesá. Nejnižších hodnot se dosahuje při teplem zpracování, které odpovídá konfiguraci 8. Při zvýšení teploty je tažnost při stejných časech menší. Odchyly mohou být způsobeny vadami v odlitku způsobenými technologií odlévání.

4.1.4. Závislost tvrdosti na teplotě a době umělého stárnutí



Obr. 23: Závislost tvrdosti na teplotě a době umělého stárnutí

V grafu na obr. 23 je znázorněna závislost tvrdosti na teplotě a době umělého stárnutí. Hodnoty jsou proloženy přímkovou spojnici trendu s vzestupným charakterem. Tvrdost se zvyšuje s dobou umělého stárnutí. Při zvýšení teploty je tvrdost při stejném čase vyšší. Nejvyšších hodnot se dosahuje při tepelném zpracování, které odpovídá konfiguraci 8. Odchyly v grafu mohou být způsobeny vadami v odlitku, které vznikají při odlévání.

4.1.5. Průměrné hodnoty mechanických vlastností

Tab. 6 Průměrné hodnoty mechanických vlastností jednotlivých konfigurací viz Tab3

Konfigurace	Rm [MPa]	Rp0,2 [MPa]	A [%]	Tvrdost [HB]
1	229,658	152,294	5,262	89,56
2	237,424	160,354	4,538	92,4
3	240,256	171,12	4,484	94,44
4	245,886	178,856	4,268	95,72
5	233,132	165,21	4,57	91,24
6	241,132	172,52	4,504	93,56
7	246,904	182,248	4,418	95,4
8	252,086	192,242	3,674	97,08

Průměrné hodnoty mechanických vlastností viz tab. 6 potvrzují, že v konfiguraci 8 při umělém stárnutí o teplotě 160°C a čase 5 hodin dosahují mez pevnosti v tahu, smluvní mez kluzu a tvrdost nejvyšších hodnot a tažnost nejnižších hodnot.

4.1.6. Porovnání mechanických vlastností

Mechanické vlastnosti dosažené při konfiguraci 8 viz tab. 6 odpovídají přibližně mechanickým vlastnostem z tab. 7 u slitiny AlSi7Mg0,3 lité do písku a tepelně zpracované na optimální pevnost a tažnost.

Tab. 7: Mechanické vlastnosti hliníkových slitin

Označení slitiny			Mechanické vlastnosti											
VDS	číselné	chemické	Stav slitiny	R _m (MPa)	R _{p0,2} (MPa)	A ₅₀ (%)	HBS	Stav slitiny	R _m (MPa)	R _{p0,2} (MPa)	A ₅₀ (%)	HBS		
Slitiny s vysokými mechanickými vlastnostmi														
	EN AC-21000	EN AC-AlCu4MgTi	Kovová forma	T4	320	200	8	95	Písková forma	T4	300	200	5	90
	EN AC-21100	EN AC-AlCu4Ti		T6 T64	330 320	220 180	7 8	95 90		T6 T64	300 280	200 180	3 5	95 85
	EN AC-42100	EN AC-AlSi7Mg0,3		T6 T64	290 250	210 180	4 8	90 80		T6	230	190	2	75
	EN AC-4220	EN AC-AlSi7Mg0,6		T6 T64	320 290	240 210	3 6	100 90		T6	250	210	1	85
	EN AC-4330	EN AC-AlSi9Mg		T6 T64	290 250	210 180	4 6	90 80		T6	230	190	2	75
	EN AC-44400	EN AC-AlSi11		L	170	80	7	45		L	150	70	6	45
Slitiny pro speciální použití														
260	EN AC-48000	EN AC-AlSi12CuNiMg	Kovová forma	T5 T6	200 280	185 240	< 1 < 1	90 100	Písková forma					
242	EN AC-51000	EN AC-AlMg3(b)		L	150	70	5	50		L	140	70	3	50
242	EN AC-51100	EN AC-AlMg3(a)		L	150	70	5	50		L	140	70	3	50
244	EN AC-51300	EN AC-AlMg5		L	180	100	4	60		L	160	90	3	55
245	EN AC-51400	EN AC-AlMg5Si		L	180	110	3	65		L	160	100	3	60

5. Závěr

1. **Mez pevnosti a smluvní mez kluzu** slitiny AlSi7Mg0.3 s rostoucí teplotou umělého stárnutí jednoznačně roste – proces stárnutí se vlivem teploty urychlí, stejných hodnot mechanických vlastností je dosaženo v kratším čase.
2. Vliv teploty umělého stárnutí na **tažnost** slitiny není tak výrazný (i díky většímu rozptylu naměřených hodnot) – rozdíl v hodnotách tažnosti naměřených po stejné době stárnutí představuje cca 0,3%.
3. Vliv teploty umělého stárnutí na **tvrdost** je naopak výrazný, teplota proces stárnutí urychluje – při zvýšené teplotě je stejné hodnoty dosaženo v kratším čase.

6. Seznam použité literatury

- [1] Michna, Š. a kol.: Encyklopedie hliníku, Prešov: Adin, 2005. ISBN 80-89041-88-4
- [2] Roučka, J.: Metalurgie neželezných slitin, Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2004
- [3] Chvojka, J. , Brzobohatý, M.: Zpracování a použití hliníku, Praha: SNTL, 1961
- [4] Macek, K. , Zuna, P. a kol.: Strojírenské materiály, Praha: ČVUT, 2003
- [5] Ptáček, L. a kolektiv: Nauka o materiálu I, Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2003
- [6] Ptáček, L. a kolektiv: Nauka o materiálu II, Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002
- [7] Metalography and Microstructures, Vol 9, ASM Handbook, ASM International, 2004